

块石出露对喀斯特坡耕地土壤理化性质的影响

陈磊¹, 张卓栋^{1,2}, 李业桐¹

(1.北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 喀斯特坡面伴有大量直径 >25 cm 的块石出露, 为探明块石出露对土壤理化性质的影响, 以坡面 4 个块石出露的农地和 1 个对照组为研究对象, 分析土壤理化性质空间变异特征。结果表明: (1) 在块石出露的农地中, 土壤容重、黏粒、粉粒和砂粒的变化分别为 $0.87\sim 1.42$ g/cm³, $25.70\%\sim 41.80\%$, $38.11\%\sim 51.60\%$, $13.76\%\sim 27.54\%$, 土壤容重、黏粒和粉粒空间变异性均为弱且高于对照组, 砂粒空间变异性为中等且低于对照组。 (2) 土壤全碳、全氮、全磷、全钾变化分别为 $9.82\sim 23.13$, $0.94\sim 2.15$, $0.65\sim 2.93$, $7.38\sim 20.35$ g/kg, 土壤有效磷、速效钾的变化分别为 $1.44\sim 2.63$, $7.35\sim 106.02$ mg/kg, 空间变异性均为中等且高于对照组。 (3) 土壤容重、黏粒、粉粒与其他土壤理化性质之间的关系总体上呈负相关, 且相关性在块石出露的农地中比对照组更显著。砂粒与黏粒之间呈显著负相关, 与其他土壤化学性质之间的关系总体上呈正相关。 (4) 块石出露数量、出露坡度、出露比率和出露高度, 对土壤理化性质的影响具有复杂性, 土壤理化性质的空间变异随块石出露特征不同而存在差异性。研究结果有助于深入理解喀斯特坡面块石出露对侵蚀过程和机制的影响, 为土壤侵蚀和水土保持工作提供科学借鉴。

关键词: 喀斯特; 坡耕地; 块石出露; 土壤理化性质; 空间变异

中图分类号: S153; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0228-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.06.029

Effect of Rock Outcropping on Soil Physicochemical Properties on Karst Sloping Cropland

CHEN Lei¹, ZHANG Zhuodong^{1,2}, LI Yetong¹

(1. Faculty of Geographic Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: In order to investigate the effect of rock outcrops on soil physicochemical properties, four rock outcrops and one control group were used to analyse the spatial variability of soil physicochemical properties. The results showed that: (1) In the sloping cropland with rock outcropping, the variation range of soil bulk density, clay, silt, and sand was $0.87\sim 1.42$ g/cm³, $25.70\%\sim 41.80\%$, $38.11\%\sim 51.60\%$ and $13.76\%\sim 27.54\%$, respectively. The spatial variation of soil bulk density, clay and silt was weak and higher spatial variability than that of the control. The spatial variability of sand grains was moderate and lower than that of the control. (2) The spatial variability of soil total carbon, total nitrogen, total phosphorus and total potassium ranged from 9.82 to 23.13, 0.94 to 2.15, 0.65 to 2.93 and 7.38 to 20.35 g/kg, respectively, while the spatial variability of soil effective phosphorus and fast-acting potassium ranged from 1.44 to 2.63 and 7.35 to 106.02 mg/kg, respectively, all with medium and higher spatial variability than the control group. (3) Soil bulk density, clay and silt were negatively correlated with other soil physicochemical properties, and the correlation was more significant in the sloping cropland with rock outcropping than that of the control group. There was a significant negative correlation between sand and clay, and a positive correlation between sand and other soil chemical properties. (4) The number, gradient, ratio, and height of rock outcropping had a complex impact on soil physical and chemical properties. The spatial variation of soil physicochemical properties varied with the characteristics of different rock outcropping. The research results contribute to a deeper understanding of the impact of rock outcropping on the erosion process and mechanism on karst slope, and provide scientific

收稿日期: 2023-05-27

资助项目: 国家自然科学基金重点项目 (41730748)

第一作者: 陈磊 (1994—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 202031051014@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 张卓栋 (1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zzhang@bnu.edu.cn

reference for soil erosion and soil conservation work.

Keywords: karst; sloping cropland; rock outcropping; soil physicochemical properties; spatial variation

喀斯特地貌是全球地貌多样性的重要组成部分,约占全球地表面积的 12%^[1]。贵州省是我国西南喀斯特地貌的典型代表区,也是世界上面积最大的连续喀斯特分布区^[2]。喀斯特坡面生态系统具有脆弱性和独特性,其特点是地表崎岖、土层瘠薄且不连续^[3],并伴随着大量直径>25 cm 且形状不规则的块石出露。此外,该地区人口稠密,贫困发生率较高^[4]。因此,为提高粮食产量,在人类耕垦的历史过程中,坡耕地被广泛开垦,导致土壤侵蚀和石漠化等生态环境问题接踵而来。

土壤是一种有限资源,其对生物多样性的演变、气候变化、公共卫生和粮食安全至关重要^[5]。然而,土壤侵蚀通常被认为是严重的社会、经济、生态和环境问题。土壤侵蚀不仅导致土地退化、土壤肥力和作物产量下降,还导致水库淤塞、河道淤积和水质污染等自然灾害^[6-7]。土壤理化性质是影响土壤侵蚀强度的重要因素之一,在空间尺度上存在相对变异性,从而导致土壤侵蚀的差异^[8]。坡面块石出露是石漠化演替的表征,对土壤形成过程和土壤理化性质具有重要影响^[9],而土壤理化性质在坡面生态系统的健康发展过程中具有关键作用。因此,有必要量化块石出露坡耕地不同空间位置土壤理化性质的变化,有助于深入理解块石出露对坡面侵蚀过程和机制的影响。受自然因素(气候、生物、母质、地形、时间)和人类活动的影响,土壤理化性质在区域空间尺度上存在显著差异性。

目前,在喀斯特地区,已有研究分析土地利用方式^[10-11]、石漠化强度^[12]、母质类型^[13]、岩层倾向^[14]、植物多样性^[15]、地形、人类耕作^[16]、施肥和灌溉等^[17]措施对土壤理化性质的影响。地形因素直接影响地表径流的再分配,地表径流在坡面块石出露的影响下,改变径流的产流面积和路径,从而间接影响土壤理化性质及侵蚀过程^[18-19]。陈磊等^[20]研究发现,喀斯特坡面块石上下不同部位土壤含水量有显著差异,因此,块石出露及其形状对土壤水分入渗具有显著影响^[21]。土壤中物质运移和养分的迁移转化受土壤含水量影响明显,土壤含水量越高,保墒时间越长,促进土壤中物质的淋溶,进而改变和影响土壤的理化性质。然而,在喀斯特坡耕地中有块石出露的情况下,关于土壤理化性质在不同部位是否存在空间变异的研究甚少。鉴于此,通过对比分析同一喀斯特坡面 4 个块石出露的农地中土壤理化性质的空间差异,同时,将无块石出露的农地作为对照,揭示块石出露坡耕地中不同部位和深度土壤理化性质的空间变化特征,为土壤侵蚀和水土保持工作提供科学借鉴。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省遵义市汧洋水小流域(106°38′39″E,27°35′44″N),该流域是贵州省重要的水土保持监测站。位于黔北喀斯特高原区,平均海拔 1 012.7 m,流域面积约 20.9 km²。气候类型属于典型的亚热带湿润季风气候,年均气温 14.6 ℃,年降水量 1 024 mm,降水主要集中在 5—8 月,降水类型主要以短历时强降雨为主。坡面地形特征主要是短陡坡,坡度范围 1°~18°。坡面土壤类型为酸性黄壤,黏粒和粉粒含量较高。目前,主要的土地利用类型为耕地、林地、草地。玉米(*Zea mays* L.)、大豆(*Glycine max* L.)和油菜籽(*Brassica campestris* L.)是每年轮换的主要耕种作物。

1.2 供试材料

2022 年 4—5 月,对坡面农地中的主要耕作物和块石出露的情况进行详细的实地调查,5 月 2—7 日进行土壤样品采集,期间无大雨和暴雨发生。为减小坡位、土地利用及降雨的空间差异对试验结果的影响,所选的 5 个样地均在坡中位置,并种植相同作物。选择 4 个典型的并伴随不同形状块石天然出露的玉米坡耕地,同时选择 1 个无块石出露的玉米坡耕地作为对照。基于调查发现,坡面的农地均为不连续的块状坡耕地,坡长约为 10 m。因此,在 4 个块石出露的坡耕地中布设长、宽分别为 12,10 m 的样方,平均坡度范围为 10°~20°,块石出露样地的具体信息见表 1。在每个样方框内选择 3 个空间位置,上部、中部和下部,并在这 3 个空间位置上分别以条带式进行采样,每个条带上有 5 个采样点,每个采样点分为上(0—10 cm)和下(10—20 cm)2 个土层采样(图 1),每 2 个采样点之间间隔 3 m,块石出露样地共采集 120 个土样。在对照组中,以条带式采样,每个采样点分为上(0—10 cm)和下(10—20 cm)2 个土层采样,每 2 个采样点之间间隔 2 m,对照组共采集 20 个土样。同时,用环刀共采集 140 个土样测量土壤容重。最后,在每 1 个块石出露的样方框内测量块石的数量、坡面的坡度、每 1 块块石的面积和高度。

表 1 块石出露样地具体信息

样地	坡位	土地 利用	块石 数量	坡度/ (°)	块石 出露率/%	块石出露 高度/cm
K1	坡中	玉米	49	18.18	23.29	28.10
K2			33	15.47	21.36	23.15
K3			23	11.91	25.07	35.30
K4			31	13.08	21.30	26.71
对照组			0	13.21	0	0

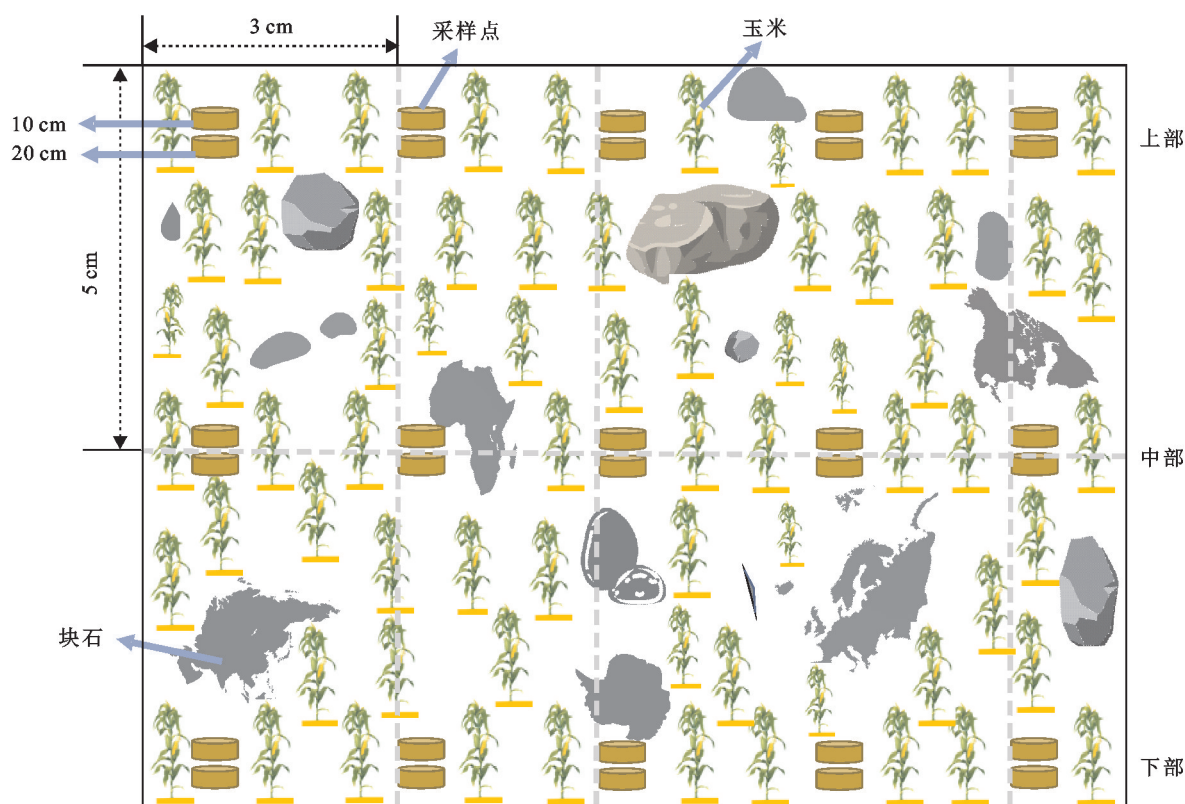


图 1 坡面块石出露坡耕地土壤采样示意

1.3 土壤理化性质测定

土壤理化性质测定均在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室进行,利用环刀法^[22]测定土壤容重。所有土壤样品风干研磨,部分过 2 mm 尼龙筛,取 0.2 g 土放入 50 mL 烧杯,加入 10 mL 10% H_2O_2 ,水浴加热充分反映去除样品中的有机质,然后加入 2 滴 10% 的 HCl 去除碳酸盐,向烧杯中加入纯水并静置 12 h 以上,抽出上清液,重复 3 次,洗酸至 pH 低于 7,然后加入六偏磷酸钠后用手轻轻摇晃烧杯使土壤颗粒充分分散,最后用超高速智能粒度分析仪 (Mastersizer 3000) 测定土壤粒度。土壤粒径分级采用美国制分级标准^[23]方法,分为黏粒($0\sim 2\ \mu m$)、粉粒($2\sim 50\ \mu m$)和砂粒($50\sim 2\ 000\ \mu m$)。

其余每个土样过 0.15 mm 尼龙筛,每个土样用锡舟包裹 80 mg 左右,并用 CN 802 碳氮元素分析仪 (Velp, 意大利) 通过燃烧法^[22]测定全碳、全氮。每个土样称取 0.1 g 加入消解罐,并加入 2 mL 氢氟酸、1 mL 高氯酸和 3 mL 硝酸,使用微波消解萃取系统对土壤消解,消解完成后,将消解罐转移到赶酸板上,180 °C 下赶酸至近一滴,然后倒入 50 mL 离心管中,加入 25 g 纯水,最后在电感耦合等离子体发射光谱仪上测定全磷、全钾和有效钾。有效磷首先通过浓盐酸和浓硫酸双酸浸提,然后采用钼锑抗比色法^[22]测定。

1.4 数据处理

块石出露坡耕地和对照组土壤理化性质的空间变异性,采用单因素方差 (One-way ANOVA) 分析和

LSD 多重比较,皮尔逊相关分析用于计算块石出露特征和土壤理化性质之间的关系。描述性统计包括 K-S 正态分布检验、最小值、最大值、平均值、标准差 (SD) 和变异系数 (CV) 等。CV 用来反映土壤理化性质的空间变异性特征,当 $CV\leq 10\%$ 时,变异性为弱;当 $10\%< CV<100\%$ 时,变异性为中等;当 $CV\geq 100\%$ 时,变异性为强。所有统计分析均使用 IBM SPSS 26、Microsoft Excel 2019 和 Origin Pro 2023 软件进行。

2 结果与分析

2.1 块石出露坡面土壤物理性质空间变异

在不同块石出露的农地中,各土层之间的土壤容重和粒度与对照组存在显著差异。对照组土壤容重明显大于块石出露的农地,随着土层深度加深,容重均变大 (图 2a)。土壤容重在 4 个块石出露的农地中变化范围为 $0.87\sim 1.42\ g/cm^3$,在对照组中的变化范围为 $1.18\sim 1.50\ g/cm^3$ (表 2)。土壤容重的空间变异性为 $K1>K3>对照>K2>K4$,总体上表现为弱变异,块石出露农地 (9.18%) $>$ 对照 (8.15%)。由图 2 可知,在 10—20 cm 土层,对照组中黏粒含量显著低于块石出露的农地,而粉粒和砂粒含量显著高于块石出露的农地。对于块石出露农地,黏粒和粉粒含量随土壤深度增加而增多,砂粒含量则减少,且在 4 个块石出露的农地中,粉粒含量在土层间无显著差异,而黏粒和砂粒则存在显著差异。由土壤物理特征描述性统计 (表 2) 可知,在 4 个块石出露农地中,黏

粒变化为 25.70%~41.80%，在对照组中的变化为 20.94%~28.37%，黏粒空间变异性均高于对照组，均值表现为弱变异(9.30%)，对照组为弱变异(7.89%)。4 个块石出露农地中，粉粒的变化为 38.11%~51.60%，在对照组中的变化为 46.92%~52.79%。粉粒空间

变异性均高于对照组，均值表现为弱变异(4.74%)，对照组为弱变异(3.14%)。砂粒在 4 个块石出露的农地中变化为 13.76%~27.54%，在对照组中的变化为 19.91%~32.14%，均值表现为中等变异 11.02%，对照组为中等变异 13.05%。

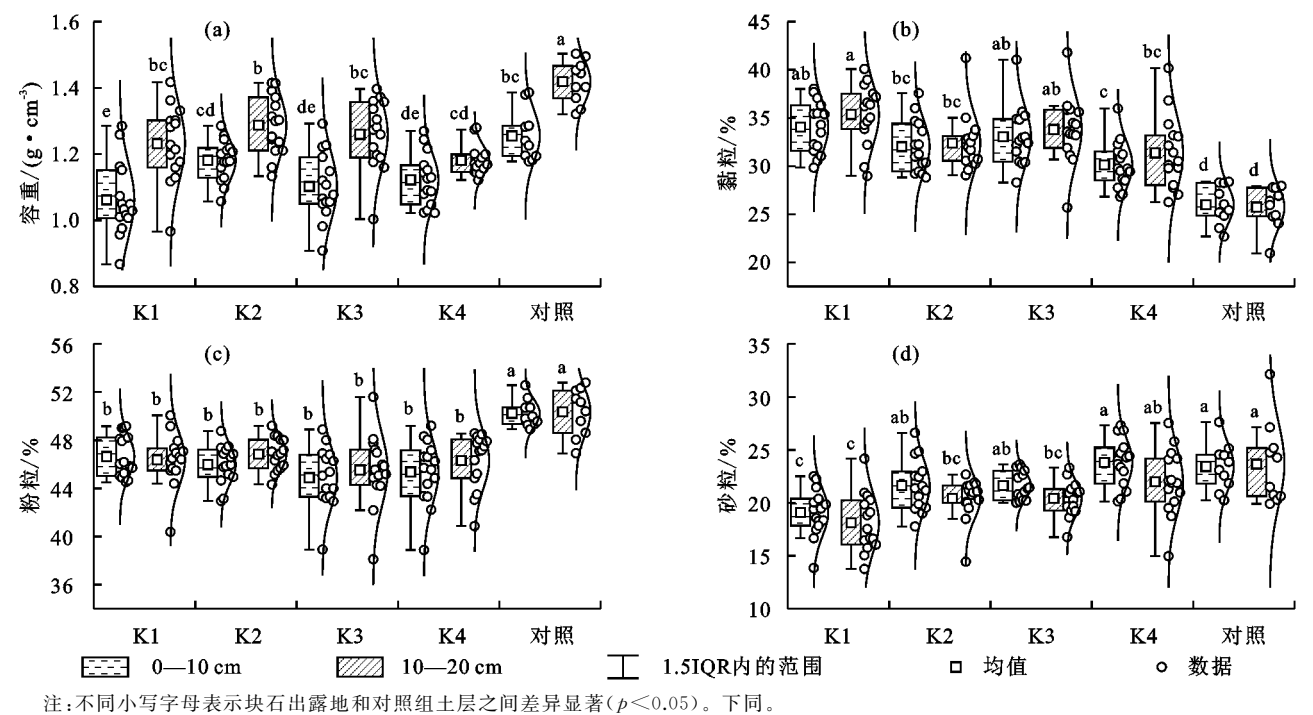


图 2 块石出露坡面土壤物理性质空间变异

表 2 块石出露坡面土壤物理性质描述性统计特征

物理指标	样地	最小值	最大值	平均值±标准偏差	SD	CV/%	变异性
容重/(g·cm ⁻³)	K1	0.87	1.42	1.15±0.14c	0.14	12.24	中等
	K2	1.06	1.41	1.23±0.09b	0.09	7.51	弱
	K3	0.91	1.40	1.18±0.13bc	0.13	10.91	中等
	K4	1.02	1.28	1.15±0.07c	0.07	6.06	弱
	对照	1.18	1.50	1.34±0.11a	0.11	8.15	弱
黏粒/%	K1	28.97	40.08	34.69±2.97a	2.97	8.55	弱
	K2	28.82	41.22	32.20±2.78bc	2.78	8.63	弱
	K3	25.70	41.80	33.42±3.24ab	3.24	9.68	弱
	K4	26.26	40.18	30.74±3.17c	3.17	10.32	中等
	对照	20.94	28.37	25.86±2.04d	2.04	7.89	弱
粉粒/%	K1	40.39	50.06	46.51±1.95b	1.95	4.19	弱
	K2	42.96	49.20	46.42±1.54b	1.54	3.31	弱
	K3	38.11	51.60	45.21±2.72b	2.72	6.01	弱
	K4	38.88	49.20	45.84±2.50b	2.50	5.46	弱
	对照	46.92	52.79	50.29±1.58a	1.58	3.14	弱
砂粒/%	K1	13.76	24.18	18.60±2.51c	2.51	13.49	中等
	K2	14.45	26.61	21.02±2.26b	2.26	10.74	中等
	K3	16.77	23.64	21.02±1.59b	1.59	7.55	弱
	K4	14.97	27.54	22.90±2.81a	2.81	12.28	中等
	对照	19.91	32.14	23.54±3.07a	3.07	13.05	中等

2.2 块石出露坡面土壤化学性质空间变异

在不同块石出露的农地中,各土层间的 C、N、P、K 存在显著差异(图 3)。全碳、全氮、全钾和速效钾

含量在块石出露的农地中显著高于对照组,而全磷和有效磷含量显著低于对照组。表明块石出露增加农地的全碳、全氮、全钾和速效钾含量。除全钾之外,全碳、全氮、全磷、有效磷和速效钾含量均随着土层加深而减少。由土壤化学特征描述性统计(表 3)可知,在 4 个块石出露的农地中,土壤 C、N、P、K 的空间变异与对照组存在显著差异。

全碳的变化为 9.82~23.13 g/kg,在对照组中的变化为 10.85~16.93 g/kg,全碳空间变异性均高于对照组,均值表现为中等变异 17.33%,对照组为中等变异(11.09%)。全氮的变化为 0.94~2.15 g/kg,在对照组中的变化为 0.98~1.29 g/kg,全氮空间变异性均高于对照组,均值表现为中等变异(16.60%),对

照组为弱变异(7.62%)。全磷的变化为 0.65~2.93 g/kg,在对照组中的变化为 1.43~2.17 g/kg,全磷空间变异性均高于对照组,均值表现为中等变异(22.02%),对照组为中等变异(10.43%)。全钾的变化为 7.38~20.35 g/kg,在对照组中的变化为 8.38~10.19 g/kg,全钾空间变异性均高于对照组,均值表现为中等变异(11.87%),对照组为弱变异(6.41%)。有效磷的变化为 1.44~2.63 mg/kg,在对照组中的变化为 1.69~2.30 mg/kg,有效磷空间变异性,均值表现为中等变异(12.47%),对照组为弱变异(9.35%)。速效钾的变化为 7.35~106.02 mg/kg,在对照组中的变化为 9.17~38.92 mg/kg,速效钾空间变异性,均值表现为中等变异(48.92%),对照组为中等变异(42.25%)。

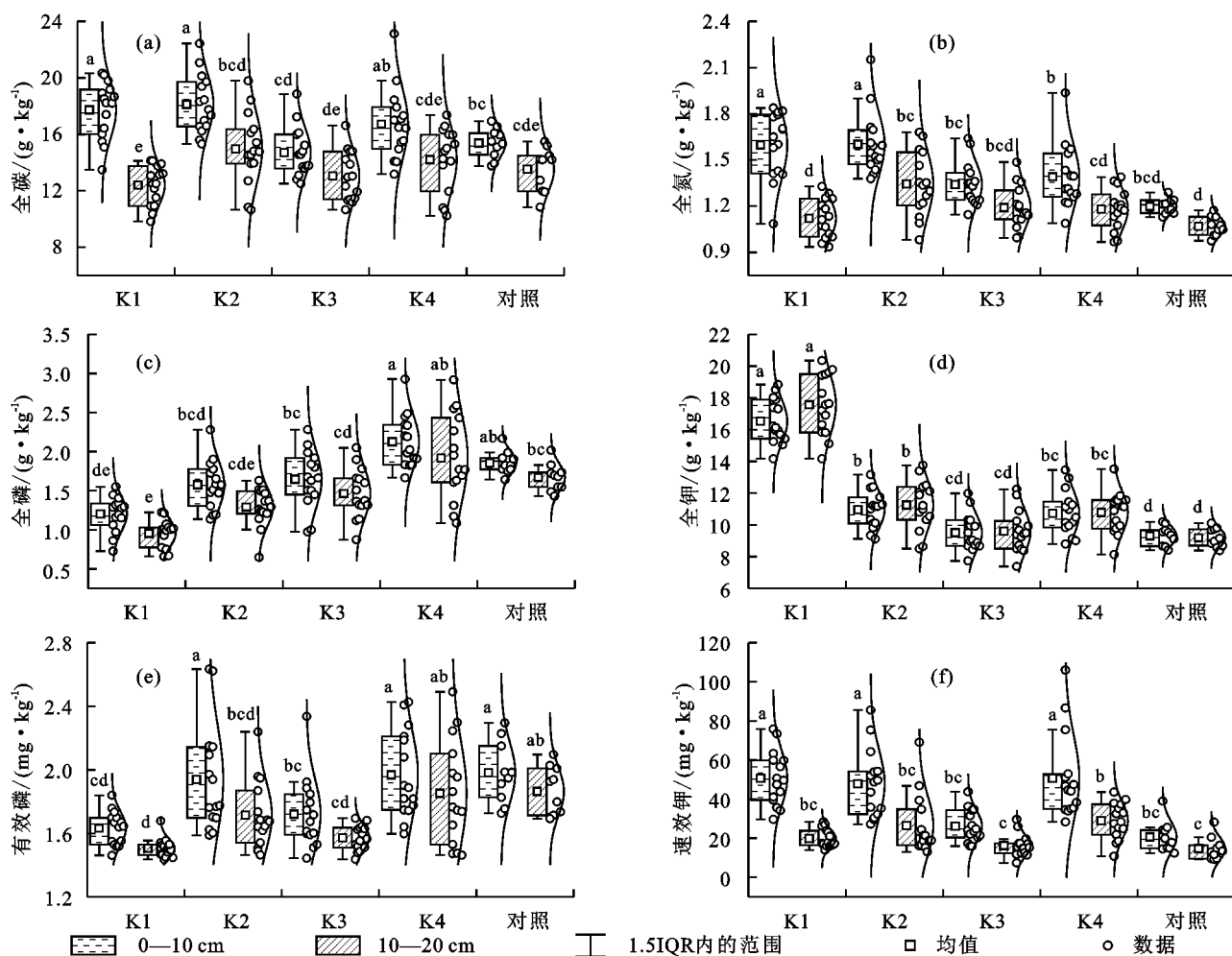


图 3 块石出露坡面土壤化学性质空间变异

2.3 块石出露坡面土壤理化性质的关系

由 4 个块石出露农地和对照组土壤理化性质的相关性分析(图 4)可知,在 K1 和 K2 中,土壤容重与全碳、全氮、全磷、有效磷和速效钾之间呈显著负相关。在 K3 和 K4 中,容重与粉粒呈显著正相关,与速效钾呈显著负相关。对照组中,土壤容重与其他理化性质的相关性则不强。在 K1、K2 和 K3 中,黏粒与粉粒,黏粒与砂粒之间呈显著负相关。在 K2 和

K3 中,黏粒和全碳之间呈显著负相关。块石出露的农地中,土壤容重、黏粒、粉粒与其他土壤理化性质的之间的关系总体上呈负相关,且相关性在块石出露的农地中比对照组更显著。砂粒与黏粒之间呈显著负相关,与其他土壤化学性质之间总体上呈正相关。块石出露的农地中,全碳与全氮、全磷、有效磷、速效钾之间,全氮与速效钾之间,全磷与有效磷之间,均为显著正相关。

表 3 块石出露坡面土壤化学性质描述性统计特征

物理指标	样地	最小值	最大值	平均值±标准偏差	SD	CV/%	变异性
全碳/(g·kg ⁻¹)	K1	9.82	20.34	15.07±2.21ab	2.21	21.29	中等
	K2	10.66	22.44	16.54±2.78a	2.78	16.80	中等
	K3	10.67	18.86	13.87±1.92b	1.92	13.85	中等
	K4	10.23	23.13	15.47±2.69ab	2.69	17.39	中等
	对照	10.85	16.93	14.45±1.60b	1.60	11.09	中等
全氮/(g·kg ⁻¹)	K1	0.94	1.84	1.36±0.30ab	0.30	22.06	中等
	K2	0.98	2.15	1.47±0.24a	0.24	16.32	中等
	K3	1.00	1.64	1.27±0.16bc	0.16	12.38	中等
	K4	0.97	1.94	1.29±0.20b	0.20	15.65	中等
	对照	0.98	1.29	1.13±0.09c	0.09	7.62	弱
全磷/(g·kg ⁻¹)	K1	0.66	1.55	1.08±0.23d	0.23	21.57	中等
	K2	0.65	2.28	1.43±0.31c	0.31	21.56	中等
	K3	0.87	2.28	1.55±0.35bc	0.35	22.37	中等
	K4	1.09	2.93	2.02±0.46a	0.46	22.56	中等
	对照	1.43	2.17	1.76±0.18b	0.18	10.43	中等
全钾/(g·kg ⁻¹)	K1	14.16	20.35	17.04±1.72a	1.72	10.07	中等
	K2	8.50	13.76	11.10±1.36b	1.36	12.29	中等
	K3	7.38	12.25	9.55±1.22c	1.22	12.76	中等
	K4	8.13	13.52	10.76±1.33b	1.33	12.34	中等
	对照	8.38	10.19	9.25±0.59c	0.59	6.41	弱
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	K1	1.44	1.84	1.57±0.11b	0.11	6.78	弱
	K2	1.46	2.63	1.83±0.30a	0.30	16.41	中等
	K3	1.44	2.34	1.65±0.18b	0.18	10.93	中等
	K4	1.46	2.49	1.91±0.30a	0.30	15.76	中等
	对照	1.69	2.30	1.92±0.18a	0.18	9.35	弱
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	K1	13.95	75.82	35.27±18.73a	18.73	53.09	中等
	K2	13.05	85.59	37.18±19.31a	19.31	51.94	中等
	K3	7.35	43.70	21.17±8.59b	8.59	40.60	中等
	K4	10.75	106.02	39.82±19.93a	19.93	50.04	中等
	对照	9.17	38.92	17.67±7.47b	7.47	42.25	中等

2.4 块石出露特征与空间变异的关系

对 4 个块石出露农地的块石出露数量、出露坡度、出露比率、出露高度与土壤物理性质的空间变异系数进行拟合(图 5)发现,土壤容重空间变异性随 4 个块石出露特征的增大而变小,块石出露比率与土壤容重拟合最好。黏粒和粉粒的空间变异性,随块石出露数量和出露坡度的增大而减小,随着出露高度的增加而变大,而砂粒的空间变异性则恰好相反。块石出露率与黏粒空间变异性没有关系,块石出露率越大,粉粒的空间变异性越大,而砂粒的空间变异性则越小。

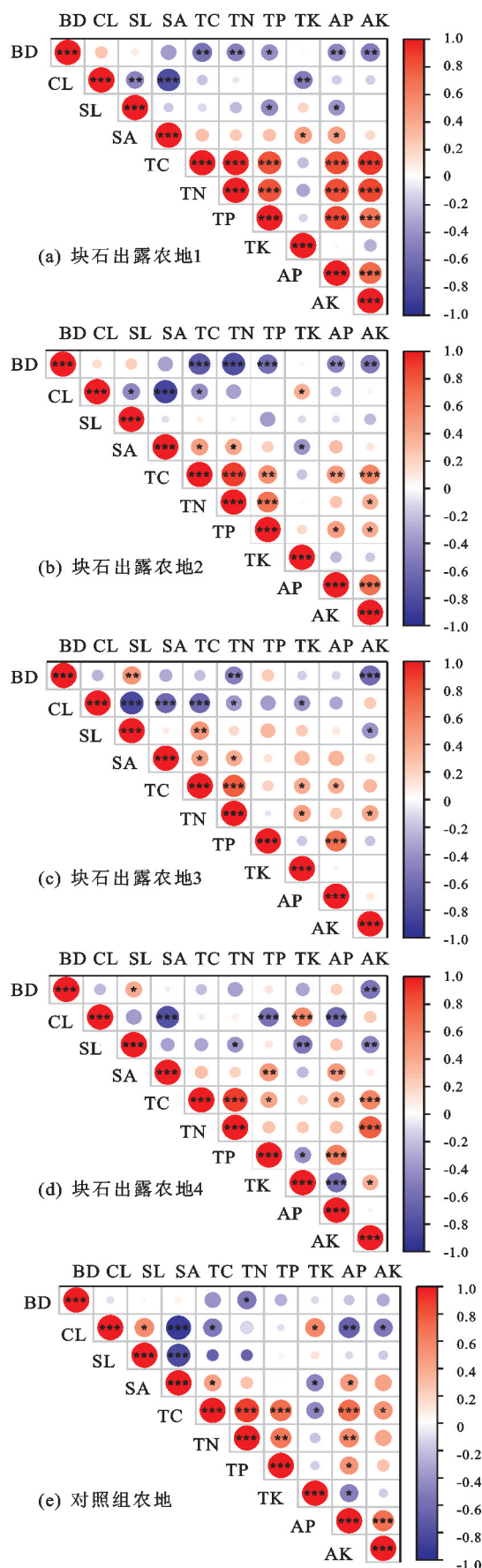
对 4 个块石出露农地的块石出露数量、出露坡度、出露比率、出露高度与土壤化学性质的空间变异系数进行拟合(图 6)发现,全碳和全氮、全磷和全钾空间变异性,均随块石出露特征变化趋势相似。块石出露数量越多、出露坡度越大,全碳、全氮和速效钾的空间变异性越大,而全磷、全钾和有效磷的空间变异性则越小。块石出露率的变化与全碳、全氮、

全磷和全钾空间变异性基本没关系,而块石出露率增加能降低有效磷和速效钾的空间变异性。块石出露高度的增加则降低全碳、全氮、有效磷和速效钾的空间变异性,但也增加全磷的空间变异性,与全钾的空间变异则无关。

3 讨论

3.1 块石出露对土壤物理性质的影响

块石出露在调节土壤渗透性方面扮演着重要角色^[21],通过调节土壤水分从而进一步影响土壤容重。块石出露的农地在同一土层其土壤容重显著低于对照组,意味着块石出露的农地土壤更疏松,渗透性和抗蚀性强。块石出露的农地中,其土壤容重的空间变异性(9.18%)大于对照(8.15%),可能是地表径流从上部向下部运移的过程中,受块石出露的影响,导致泥沙的沉积在空间分布上不均匀而引起的。此外,土壤容重还受生物过程、结皮发育、植物和作物生长、根系发育、动物和微生物活动等综合作用的影响^[24]。



注: BD、CL、SL、TC、TN、TP、TK、AP 和 AK 分别表示土壤容重、黏粒、粉粒、砂粒、全碳、全氮、全磷、全钾、有效磷和速效钾; * 表示 $p \leq 0.05$, ** 表示 $p \leq 0.01$, *** 表示 $p \leq 0.001$ 。

图 4 块石出露坡面土壤理化性质的相关性

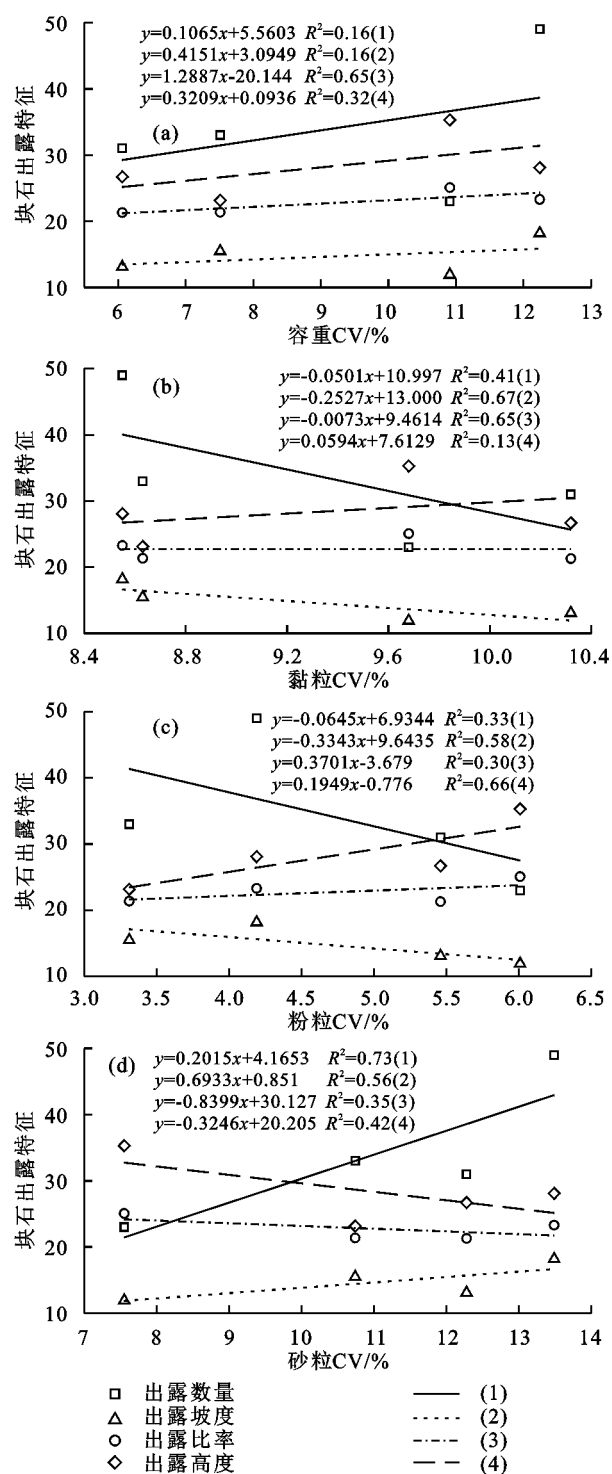


图 5 块石出露特征与土壤物理性质的拟合

土壤颗粒是土壤物理性质的固有组成部分,它通过影响饱和导水率和平均质量直径而间接影响土壤侵蚀^[6]。本研究中,土壤粒径在 4 个块石出露的农地和对照组中存在显著差异。块石出露通过干扰地表径流过程,从而影响不同空间位置土壤粒径分布,由于坡中位置土壤侵蚀严重,黏粒和粉粒含量随径流在中部空间位置流失^[25]。因此,在块石出露的农地中,黏粒和粉粒含量随空间位置下降呈先减后增趋势,然而砂粒的变化趋势则恰好相反。与 Haruna^[26] 和 Liu 等^[27] 研究结果相似。块石出露农地中,其黏粒含量

显著高于对照组,而粉粒和砂粒含量则显著低于对照组,表明在地表径流和泥沙运移的过程中,块石的出露可以拦截更多的黏粒沉积。由于径流优先输送细微颗粒,黏粒和粉粒在空间上更容易被搬运堆积。因此,块石出露农地中,黏粒和粉粒的空间变异性高于

对照,而砂粒的空间变异性低于对照。表明块石出露对农地中土壤容重、黏粒、粉粒、砂粒含量具有显著影响。通过土壤质地的空间差异可以去反推土壤侵蚀状况,如果表层侵蚀严重,则表层和底层之间的空间差异性则越大。

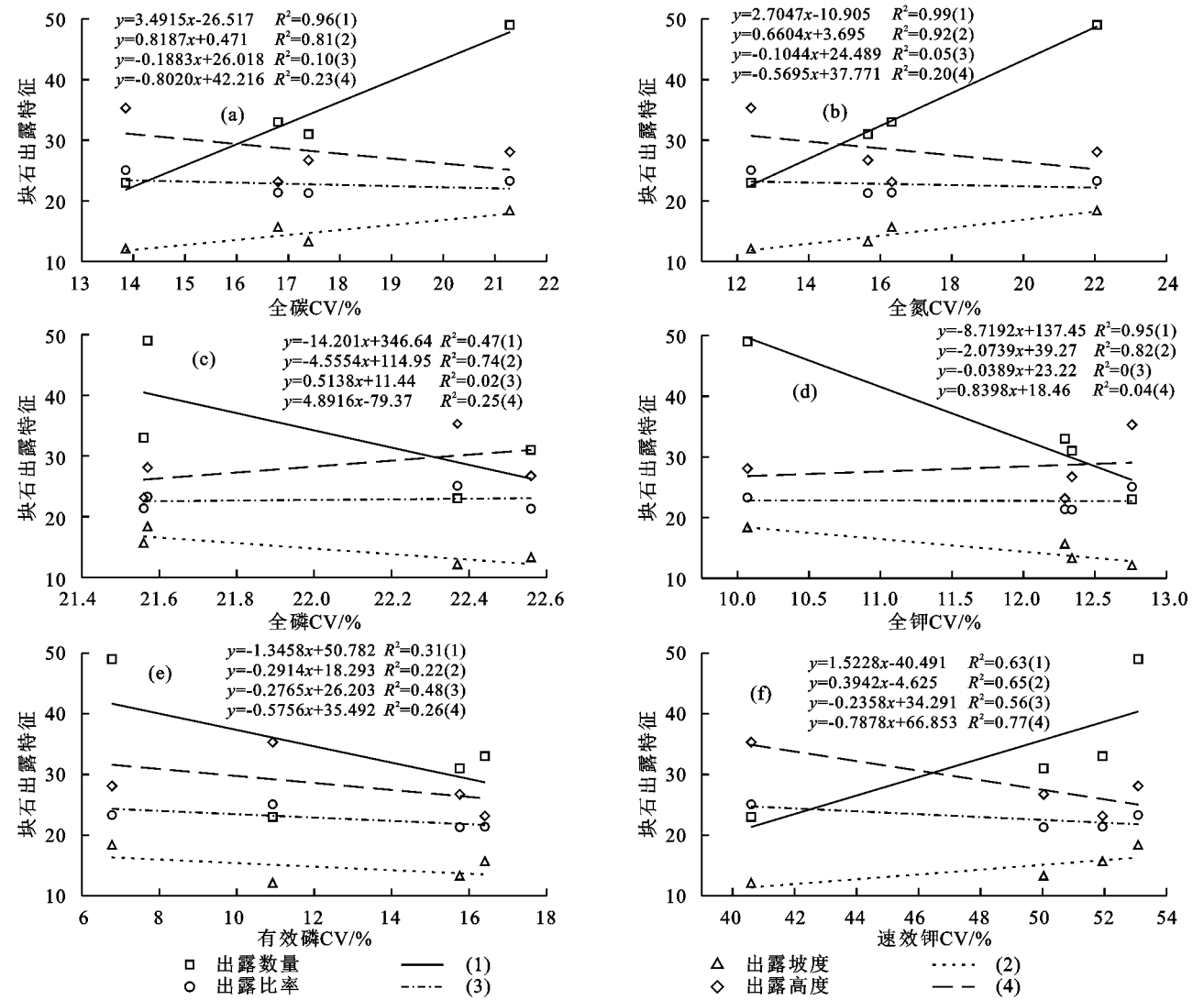


图 6 块石出露特征与土壤化学性质的拟合

3.2 块石出露对土壤化学性质的影响

喀斯特坡面出露的块石在承接降雨的过程中容易形成岩面流,并携带岩面无机或有机物质输送至块石周围,造成块石周围农地的土壤养分变化存在差异。杨威等^[28]研究表明,块石出露的形状对块石周围不同距离处土壤的氮磷淋溶具有重要影响。与对照组相比,块石出露农地中全碳、全氮、全钾和速效钾的含量显著更高,可能因为块石的出露改变地形的条件,从而改变径流的路径,减少水土流失带走的C、N和K含量,因而使块石出露的农地中C、N和K流失较少。对照组全磷和有效磷含量显著增高,可能因为外源磷肥的施用增加土壤的P含量。土壤C和P以颗粒态流失为主,N以溶解态流失为主^[29],不同的流失形态以及块石出露,导致土壤C、N和P的流失存在差异,也解释在块石出露的农地和对照

组中C、N和P存在空间变异的原因。

在块石出露农地和对照组中,土壤全碳、全氮、全磷、有效磷和速效钾含量在0—10 cm土层深度显著高于10—20 cm土层,与杜映妮等^[30]研究结果类似,是由于表层土壤更易受外界自然和人为因素干扰,植物枯枝落叶形成的腐殖质以及施肥为表层土壤提供丰富的C、N、P、K来源,因此表聚性特征明显^[31]。土壤水分的入渗可使C、N、P、K向下迁移,但其扩散能力在垂向迁移的过程中随土层深度的增加而减小,因此,下层土壤C、N、P、K含量较低。全钾含量在K1和K2处理下表现为表层与底层差异性较小,且表层<底层,可能是连作重茬导致的表层土壤全钾含量下降。

3.3 块石出露特征对土壤理化性质的影响

伴随着大量不规则块石出露的短陡坡是中国西

南喀斯特坡面独特的地貌特征,加上丰富的降水,喀斯特坡面产流活动和次数频繁多发^[32]。不同块石出露的高度、面积、坡度、耕作活动和微气候环境都可能影响表层土壤的粒径分布^[33]。Wijdenes 等^[34]提出,土壤中大量的岩石碎块能降低土壤侵蚀并促进入渗,保持粗糙的地表可能是防止荒漠化的重要策略;Hlaváčiková 等^[35]发现,岩石碎屑的形状和位置对石质土的饱和导水率具有很大影响,土壤水分是影响容重和溶质迁移的重要因子。块石出露的特征对坡面产流产沙产生重要影响,从而引起土壤理化性质的空间变异。本研究中,块石出露特征对土壤理化性质空间变异性的影响主要体现在块石出露数量越多、出露坡度越大,容重、砂粒、全碳、全氮和速效钾的空间变异性越大,而黏粒、粉粒、全磷、全钾和有效磷的空间变异性则越小;块石出露率越大,黏粒、全碳、全氮、全磷和全钾的空间变异性基本不变,砂粒、有效磷和速效钾的空间变异性越小,容重、粉粒的空间变异性越大;块石出露高度越高,砂粒、全碳、全氮、有效磷和速效钾的空间变异性越小,容重、黏粒、粉粒和全磷的空间变异性越大,全钾的空间变异则基本不变。

通过块石出露特征与土壤理化性质的相关性分析(表 4)发现,块石出露坡度与块石出露率、块石出露高度、砂粒、全磷和有效磷为显著负相关,与块石出露数量、黏粒、粉粒、全氮、全钾、速效钾呈显著正相关。块石出露率越高,则块石出露高度与黏粒含量越大。除黏粒外,总体上,块石出露率与块石出露高度与其他土壤理化性质呈显著负相关。块石出露数量与黏粒、粉粒、全钾、速效钾呈显著正相关,与砂粒、全磷、有效磷呈显著负相关。块石出露特征与土壤理化性质的相关性表现为块石出露坡度 > 块石出露数量 > 块石出露率 > 块石出露高度。

表 4 块石出露特征与土壤理化性质的相关性

项目	块石出露坡度	块石出露率	块石出露高度	块石出露数量
块石出露坡度	1.000	-0.221 *	-0.509 **	0.959 **
块石出露率	-0.221 *	1	0.930 **	-0.199 *
块石出露高度	-0.509 **	0.930 **	1	-0.420 **
块石出露数量	0.959 **	-0.199 *	-0.420 **	1
容重	-0.027	-0.070	-0.109	-0.109
黏粒	0.241 **	0.302 **	0.175	0.225 *
粉粒	0.211 *	-0.135	-0.188 *	0.193 *
砂粒	-0.433 **	-0.234 **	-0.051	-0.403 **
全碳	0.142	-0.308 **	-0.334 **	0.098
全氮	0.199 *	-0.178	-0.263 **	0.123
全磷	-0.545 **	-0.257 **	-0.002	-0.465 **
全钾	0.831 **	0.004	-0.203 *	0.882 **
有效磷	-0.209 *	-0.402 **	-0.280 **	-0.209 *
速效钾	0.187 *	-0.364 **	-0.355 **	0.200 *

注: * 表示显著相关($p < 0.05$), ** 表示极显著相关($p < 0.01$)。

4 结 论

(1)块石出露农地中,土壤容重、黏粒、粉粒和砂粒的变化分别为 $0.87 \sim 1.42 \text{ g/cm}^3$, $25.70\% \sim 41.80\%$, $38.11\% \sim 51.60\%$, $13.76\% \sim 27.54\%$,土壤容重、黏粒和粉粒的空间变异性均为弱且高于对照,砂粒的空间变异性为中等且低于对照。

(2)块石出露农地中,土壤全碳、全氮、全磷、全钾的变化分别为 $9.82 \sim 23.13$, $0.94 \sim 2.15$, $0.65 \sim 2.93$, $7.38 \sim 20.35 \text{ g/kg}$,有效磷、速效钾的变化分别为 $1.44 \sim 2.63$, $7.35 \sim 106.02 \text{ mg/kg}$,空间变异性均为中等且高于对照。

(3)块石出露农地中,土壤容重、黏粒、粉粒与其他土壤理化性质间总体上呈负相关,且相关性在块石出露的农地中比对照组更显著。砂粒与黏粒之间呈显著负相关,与其他土壤化学性质间总体上呈正相关。

(4)块石出露数量、出露坡度、出露比率和出露高度,对土壤理化性质的影响具有复杂性,土壤理化性质的空间变异随块石出露特征不同而存在差异性。

参考文献:

- [1] Goldscheider N, Chen Z, Auler A S, et al. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources[J]. Hydrogeology Journal, 2020, 28(5): 1661-1677.
- [2] Yan Y J, Dai Q H, Wang X D, et al. Response of shallow karst fissure soil quality to secondary succession in a degraded karst area of southwestern China[J]. Geoderma, 2019, 348: 76-85.
- [3] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.
- [4] 张殿发, 欧阳自远, 王世杰. 中国西南喀斯特地区人口、资源、环境与可持续发展[J]. 中国人口·资源与环境, 2001, 11(1): 77-81.
- [5] Keesstra S D, Bouma J, Wallinga J, et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals[J]. Soil, 2016, 2(2): 111-128.
- [6] Wang H, Zhang G H. Temporal variation in soil erodibility indices for five typical land use types on the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2021, 381: e114695.
- [7] Tang J, Liu G, Xie Y, et al. Annual variation of ephemeral gully erosion in a cultivated catchment[J]. Geoderma, 2021, 401: e115166.
- [8] Chen S Q, Zhang G H, Zhu P Z, et al. Impact of slope position on soil erodibility indicators in rolling hill regions of northeast China[J]. Catena, 2022, 217: e106475.
- [9] Sheng M Y, Xiong K N, Wang L J, et al. Response of soil physical and chemical properties to Rocky desertification succession in South China Karst[J]. Carbonates

- and Evaporites, 2018, 33(1):15-28.
- [10] Chen H S, Zhang W, Wang K L, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by land use types in karst and non-karst areas of northwest Guangxi, China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(5):1086-1093.
- [11] 何宇, 盛茂银, 王轲, 等. 土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(7):3752-3762.
- [12] 景宜然, 邓湘雯, 邓东华, 等. 湘西南不同石漠化程度土壤理化性质及相关性分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1):189-195.
- [13] 董玲玲, 何腾兵, 刘元生, 等. 喀斯特山区不同母质(岩)发育的土壤主要理化性质差异性分析[J]. 土壤通报, 2008, 39(3):471-474.
- [14] 贾洪杰, 甘凤玲, 李振轮, 等. 岩层倾向对南方喀斯特地区坡耕地土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(16):6107-6113.
- [15] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报, 2015, 35(2):434-448.
- [16] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分异特征的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7):1459-1463.
- [17] 薛建辉, 周之栋, 吴永波. 喀斯特石漠化山地退化土壤生态修复研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(6):135-145.
- [18] Gong T X, Zhu Y J, Shao M A. Effect of embedded-rock fragments on slope soil erosion during rainfall events under simulated laboratory conditions[J]. Journal of Hydrology, 2018, 563:811-817.
- [19] Lv J R, Luo H, Xie Y S. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil heaps through multiple rainfall events [J]. Catena, 2019, 172:179-189.
- [20] 陈磊, 张科利, 杨志成, 等. 喀斯特坡面块石对土壤水分影响的坡度响应[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2022, 20(5):1-9.
- [21] 陈磊, 张科利, 李业桐, 等. 喀斯特坡耕地块石出露对土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10):111-118.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000:14-1110.
- [23] Chaudhari K S, Singh R, Kundu K D. Rapid textural analysis for saline and alkaline soils with different physical and chemical properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(2):431-441.
- [24] Wang H, Zhang G H, Li N N, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2018, 325:18-27.
- [25] Niu Y B, Gao Z L, Li Y H, et al. Effect of rock fragment content on erosion processes of disturbed soil accumulation under field scouring conditions[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(4):1708-1723.
- [26] Haruna S I. Spatial and fractal characterization of selected soil nutrients along a catena [J]. Catena, 2021, 204:e105443.
- [27] Liu L, Zhang K L, Zhang Z D, et al. Identifying soil redistribution patterns by magnetic susceptibility on the black soil farmland in Northeast China[J]. Catena, 2015, 129:103-111.
- [28] 杨威, 彭旭东, 戴全厚, 等. 石漠化山区露石岩面流对岩-土界面土壤氮磷淋溶与输入作用的研究[J/OL]. 土壤学报:1-13[2023-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.0847.002.html>.
- [29] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量[J]. 环境科学, 2021, 42(1):251-262.
- [30] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 等. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤 C、N、P 和 K 化学计量特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1):394-402.
- [31] Wang L L, Zhang G H, Zhu P Z, et al. Soil C, N and P contents and their stoichiometry as affected by typical plant communities on steep gully slopes of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2022, 208:e105740.
- [32] Wang X Y, Li Z X, Cai C F, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China[J]. Geomorphology, 2012, 151/152:234-242.
- [33] Cen L P, Peng X D, Dai Q H, et al. Creep leakage process of remaining soils in near-surface fissures in a karst area with bedrock outcrops [J]. Catena, 2023, 221:e106802.
- [34] Wijdenes D O, Poesen J, Vandekerckhove L, et al. Chiselling effects on the vertical distribution of rock fragments in the tilled layer of a Mediterranean soil[J]. Soil and Tillage Research, 1997, 44(1/2):55-66.
- [35] Hlaváčiková H, Novák V, Šimůnek J. The effects of rock fragment shapes and positions on modeled hydraulic conductivities of stony soils [J]. Geoderma, 2016, 281:39-48.